



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL - EFL**

**AJUSTE DE MODELOS BIOMÉTRICOS PARA ESPÉCIES DA CAATINGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Departamento de Engenharia Florestal da  
Universidade de Brasília como requisito para  
obtenção do título de Engenheira Florestal

Orientanda: Renata Moura da Veiga

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Gaspar

Brasília – DF  
Dezembro de 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL - EFL**

**AJUSTE DE MODELOS BIOMÉTRICOS PARA ESPÉCIES DA CAATINGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Departamento de Engenharia Florestal da  
Universidade de Brasília como requisito para  
obtenção do título de Engenheira Florestal

Orientanda: Renata Moura da Veiga

Matrícula: 11/0138422

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Gaspar

Brasília – DF

Dezembro de 2016



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL - EFL**

**AJUSTE DE MODELOS BIOMÉTRICOS PARA ESPÉCIES DA CAATINGA**

Orientanda: Renata Moura da Veiga

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Gaspar

Menção: SS

Ricardo de O. Gaspar

Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Gaspar  
Universidade de Brasília – UnB  
Departamento de Engenharia Florestal  
Orientador

Peter Wimmer

MSc. Peter Wimmer  
Laboratório de Produtos Florestais – LPF  
Serviço Florestal Brasileiro – SFB  
Membro da Banca

Ilvan Medeiros Lustosa Junior

MSc. Ilvan Medeiros Lustosa Junior  
Doutorando em Ciências Florestais  
Universidade de Brasília – UnB  
Membro da Banca

Brasília – DF, dezembro de 2016

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais e ao meu irmão as oportunidades que me proporcionam e o carinho e cumplicidade constantes. Obrigada por sempre acreditarem em mim e torcerem pela minha vitória.

Aos amigos de vida que me acompanham há anos, obrigada pelas risadas em momentos turbulentos ou não e pela troca contínua que é conviver com vocês. À Tati, pela paciência e compreensão nos meus dias mais chatos. À família construída durante o ano de intercâmbio, com quem compartilhei diversas experiências, obrigada.

Aos amigos e colegas que tive o prazer de conhecer nesses anos de universidade, obrigada pelas histórias e pelo caminho que construímos juntos. Sucesso a todos.

Aos meus professores que por vezes me ensinaram muito mais do que o conteúdo acadêmico, obrigada por me mostrarem que a profissão não envolve só o intelecto. Em especial, agradeço ao meu orientador por me guiar nesse final de curso e ao Serviço Florestal Brasileiro, principalmente ao Peter, por também contribuir para a execução deste trabalho.

## RESUMO

O Brasil desempenha papel de destaque no mundo em políticas que visam a redução do desmatamento e do efeito estufa. Dentre os seus 5 biomas, encontra-se a Caatinga, que está localizada no nordeste do país e representa cerca de 10% do território nacional. Embora o Bioma seja impactado pela agricultura e pela exploração florestal, cerca de 36 milhões de hectares ainda são compostos por floresta nativa. Além da sua importância ecológica advinda da alta diversidade biológica, as espécies florestais da Caatinga são globalmente importantes por capturar CO<sub>2</sub> e mitigar as mudanças climáticas. Fora isso, é possível obter da Caatinga diferentes produtos madeireiros e não-madeireiros, contribuindo para o aumento de renda da população do semiárido brasileiro, a qual possui os mais baixos indicadores sociais do país. Para este estudo, foram ajustadas e selecionadas equações para estimar diâmetro de cerne, volume de madeira, quantidade de biomassa, estoque de carbono e valores de CO<sub>2</sub> capturados pela madeira das espécies estudadas. O ajuste dos modelos que estimam diâmetro de cerne e volume foram satisfatórios. As espécies são: *Pterodon abruptus* (Moric.) Benth., *Diptychandra aurantiaca* Tul., *Terminalia fagifolia* Mart., *Machaerium* cf. *brasiliensis*, *Swartzia pylonema* Harms., *Handroanthus serratifolius* (Vahl.) S. O. Grose, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & R.W., *Aspidosperma pyrifolium* Mart. e *Combretum glaucocarpum* Mart. Os indivíduos das espécies citadas foram coletados em Área de Manejo Florestal autorizada pelo governo brasileiro. Devido à importância econômica, ecológica e social do bioma em questão, torna-se urgente o aprimoramento de estudos que propõem a valorização das áreas naturais da Caatinga.

**PALAVRAS-CHAVE:** Caatinga; Modelos dendrométricos; Volumetria de madeira; Biomassa de madeira; Estoque de carbono; Diâmetro de cerne.

## ABSTRACT

Brazil is world known for its environmental policies that seek to control deforestation and greenhouse effects, affecting the entire globe. Among the five biomes existent in Brazil, one exclusive biome is the Caatinga, which is located in the northeast region and covers about 10% of the national territory. Although it suffers large impacts of agriculture and lumbering, about 36 million hectares are still native vegetation. Despite ecological benefits, Caatinga's forest species have an important role capturing and storing CO<sub>2</sub> from the atmosphere, helping climate change mitigation. Caatinga also delivers assets that come from timber and non-timber products harvesting, which have a large role in the subsistence and income of the Northeast population, the one with the lowest economic indicators in Brazil. For this paper, different equations were tested and used to estimate heartwood diameter, wood volume, wood biomass, carbon stock and CO<sub>2</sub> captured by the studied species. This study showed quality in the adjustment of the heartwood diameter and the volume models. The species are: : *Pterodon abruptus* (Moric.) Benth., *Diptychandra aurantiaca* Tul., *Terminalia fagifolia* Mart., *Machaerium* cf. *brasiliensis*, *Swartzia psilonema* Harms., *Handroanthus serratifolius* (Vahl.) S. O. Grose, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & R.W, *Aspidosperma pyrifolium* Mart. and *Combretum glaucocarpum* Mart. The tree individuals were collected in a Forest Management Area authorized by the Brazilian Government. Considering the ecological, social and environmental importance of the biome, there is urgency in developing studies that aim the appreciation of the natural areas of Caatinga.

**KEY-WORDS:** Caatinga; Dendrometric models; Wood volumetry; Wood biomass; Carbon stock; Heartwood diameter.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
2.1 Objetivos específicos .....	2
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
3.1 O semiárido brasileiro e o bioma Caatinga.....	2
3.2 As espécies a serem estudadas.....	3
3.3 O Manejo Florestal na Caatinga.....	4
3.4 Determinação do diâmetro de cerne.....	6
3.5 Modelos volumétricos para madeira .....	7
3.6 Biomassa da madeira .....	8
3.7 Estoque de carbono em madeira.....	9
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>10</b>
4.1 Ajuste dos modelos para estimar o diâmetro de cerne .....	12
4.2 Ajuste dos modelos volumétricos .....	12
4.3 Ajuste dos modelos para estimar a quantidade de biomassa .....	14
4.4 Ajuste dos modelos para estimar estoque de carbono .....	15
4.5 Conversão de carbono estocado em dióxido de carbono .....	16
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>16</b>
5.1 Modelos de diâmetro de cerne ajustados .....	17
5.2 Modelos volumétricos ajustados .....	18
5.3 Modelos de biomassa e de carbono ajustados.....	20
5.4 Quantidade convertida em CO <sub>2</sub> .....	23
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>24</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>24</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens de um disco de cada espécie estudada. Fonte: SFB, 2015.....	11
Figura 2 – Gráfico residual para o modelo que melhor estima o diâmetro de cerne.....	18
Figura 3 – Gráfico residual para a equação volumétrica que apresentou coeficientes significativos para o primeiro teste de modelos. ....	19
Figura 4 – Gráfico residual para a equação volumétrica que apresentou coeficientes significativos para o segundo teste de modelos.....	20
Figura 5 – Gráfico residual para o ajuste do modelo 26 de biomassa. ....	21
Figura 6 – Gráfico residual para o ajuste do modelo 27 de biomassa. ....	21
Figura 7 – Gráfico residual para o ajuste do modelo 34 de estoque de carbono. ....	22
Figura 8 – Gráfico residual para o ajuste do modelo 35 de estoque de carbono. ....	22



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Lista das espécies utilizadas para medição dos discos de madeira. ....	10
Tabela 2 - Médias percentuais da quantidade de cerne e alburno por espécie. ....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O bioma Caatinga é nativo brasileiro e está localizado no nordeste do país, englobando os estados Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais. Representa cerca de 11% do território nacional em área, o que equivale a 845.000 km<sup>2</sup> (IBGE, 2004). O Bioma se encontra na região de semiárido, a qual é caracterizada por um longo período de estiagem derivado dos baixos índices pluviométricos, que variam de 300 a 800 mm/ano (SFB, 2013), e das elevadas temperaturas durante todo o ano.

A falta de chuva e a alta temperatura fazem com que predominem na Caatinga as formações campestres, dominadas pela vegetação do tipo savana estépica, com árvores baixas, arbustos e diversas espécies de cactáceas (SFB, 2013). De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (2013), estima-se que a cobertura florestal da Caatinga ocupe 40.941.920 hectares, o equivalente a 48,5% do Bioma. Porém, este Bioma é alvo de intensa degradação florestal e, conseqüentemente, de perda de espécies endêmicas da região. Devido a quantidade de vegetação nativa remanescente, busca-se promover alternativas sustentáveis para a biodiversidade do Bioma, bem como a criação de áreas de conservação da vegetação que visam diminuir a conversão da paisagem (BRASIL, s.d.).

Além da elevada importância ecológica advinda da diversidade biológica, as espécies florestais da Caatinga são ambientalmente importantes. As árvores sequestram e fixam carbono a partir do processo de fotossíntese, retornando oxigênio para o ar e mitigando as mudanças climáticas (SOUZA et al., 2011). Ou seja, em se tratando de carbono, o acúmulo de biomassa beneficia a produtividade do solo, reduz a concentração do carbono atmosférico e melhora a qualidade ambiental (BERNARDI, 2007). Contudo, pouco é sabido a respeito da quantidade de carbono acumulada pelas espécies arbóreas da Caatinga.

A madeira da Caatinga é principalmente utilizada na região para gerar lenha. Porém, as espécies da Caatinga fornecem diferentes produtos madeireiros, especialmente do cerne. Dentre eles destacam-se a confecção de móveis e de instrumentos musicais e o uso da madeira para construções navais e civis. Entretanto, são raros os estudos científicos que utilizam a Caatinga como instrumento principal de trabalho, dificultando a avaliação da importância associada à produtividade dos componentes arbóreos.

Dessa forma, se faz importante estudar o Bioma. Este estudo foi realizado a partir do ajuste de modelos dendrométricos, visando estimar o diâmetro do cerne como forma de entender o potencial madeireiro das espécies; o volume dos indivíduos das espécies estudadas; a quantidade de biomassa; e o potencial de fixação de carbono e dióxido de carbono da madeira de tais espécies. A aplicação dos modelos ajustados permitirá conhecer o potencial madeireiro e de fixação de carbono das espécies da Caatinga de forma não-destrutiva. A pesquisa contribui também para a divulgação e melhor compreensão das características de espécies do Bioma, ampliando o conhecimento sobre o comportamento dessa vegetação em relação a sua participação na mitigação do efeito estufa.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral desta pesquisa é ajustar modelos matemáticos para dez espécies arbóreas da Caatinga.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Levantar a importância das espécies estudadas no contexto regional;
- Aplicar e analisar modelos matemáticos já conhecidos em espécies ainda não estudadas;
- Estimar diâmetro de cerne a partir de dados do DAP;
- Estimar o volume dos indivíduos das espécies em questão;
- Estimar a quantidade de biomassa e de carbono contidas nos indivíduos;
- Estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> estocada com a finalidade de estudar o potencial mitigador de gases de efeito estufa de tais espécies.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 O semiárido brasileiro e o bioma Caatinga**

O semiárido brasileiro ocupa uma área de 969.589,4 km<sup>2</sup> no nordeste do país e engloba os estados Ceará e Rio Grande do Norte por inteiro e parte dos estados Paraíba, Pernambuco, Piauí, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais (BRASIL, 2005). A delimitação da região se deu com base nas áreas em que a precipitação média anual é inferior a 800 milímetros e o risco de seca é maior que 60% (BRASIL, 2005).

Quanto a precipitação pluviométrica, esta é mais elevada na parte central do semiárido. Além disso, é marcada pela variabilidade espaço-temporal, que, associada aos baixos índices pluviométricos e às elevadas temperaturas – em torno de 26°C –, resulta na frequente ocorrência de dias sem chuva (CORREIA et al., 2011).

Os índices sociais e econômicos da região nordeste são os mais baixos do país. Estudos conduzidos pela Embrapa Semiárido (CORREIA et al., 2011), revelam que as sociedades rurais formam um conjunto heterogêneo de pequenos produtores que passam por transformações profundas e rápidas decorrentes do processo de modernização do campo. Tal modernização se mostra como um dos principais causadores das grandes desigualdades socioeconômicas na região.

A região do semiárido brasileiro é predominada pelo bioma Caatinga, que é representado por uma grande variedade de paisagens e ambientes resultantes, em parte, da variação constante do relevo na região (CORREIA et al., 2011). Segundo a CODEVASF (2015), os solos de maior ocorrência são os das classes dos Latossolos e Argissolos, que também contribuem para a formação das paisagens locais.

Dentre os biomas brasileiros, a Caatinga é o mais desvalorizado e mal conhecido botanicamente, contendo uma grande variedade de tipos vegetacionais, de número de espécies e de remanescentes de vegetação ainda não explorados (GIULIETTI et al., 2003).

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) afirmou neste ano que a biodiversidade do bioma ampara atividades econômicas voltadas para diversos fins comerciais, principalmente nos ramos farmacêutico, cosmético, químico e alimentício, concretizados pela exploração de frutos e pela extração de tanino e fibras das cascas e raízes.

O MMA informa ainda que o Bioma tem sido desmatado de forma acelerada, devido principalmente ao consumo de lenha nativa explorada de forma insustentável para fins domésticos e indústrias, alterando o uso do solo e convertendo áreas florestais em pecuária extensiva e em agricultura. A Caatinga tem um imenso potencial para a conservação de serviços ambientais e uso sustentável e, se bem manejada, pode ser decisiva para o desenvolvimento da região e do país.

### **3.2 As espécies a serem estudadas**

A vegetação da Caatinga compõe um conjunto de plantas que se distingue dos conjuntos formados em outros biomas, e por isso tem chamado a atenção de estudiosos nas

últimas décadas, mas ainda são poucos os estudos desenvolvidos sobre a região (GIULIETTI et al., 2003).

As características edafoclimáticas da Caatinga influenciam na composição arbórea-arbustiva da região, na qual predomina uma vegetação caracterizada pela rusticidade, tolerância e adaptação às condições climáticas locais (CORREIA et al., 2011), prevalecendo no Bioma a ocorrência de árvores baixas, arbustos e cactáceas (SFB, 2013). Porém, as espécies estudadas são árvores maiores, que fogem do padrão observado na Caatinga, e por isso estão sendo alvo deste estudo.

Alguns autores confirmam as importâncias ambientais e econômicas de espécies da Caatinga. Segundo Lorenzi (2008), Lima (2011) e Maia (2012), as espécies *Plathymenia reticulada* Benth., *Diptychandra aurantiaca* Tul. e *Terminalia fagifolia* Mart. são recomendadas para a recomposição de áreas degradadas por se adaptarem bem a solos pobres. Lima (2011) ainda inclui neste grupo as espécies *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & R.W.Jobson. e *Aspidosperma pyrifolium* Mart. por serem pioneiras e de rápido crescimento. Além disso, estes autores afirmam que as espécies já citadas são usadas em construções civis por possuírem madeira de boa qualidade.

Para Lorenzi (2008), vale destacar que a madeira da *Swartzia psilonema* Harms. é bastante desenhada e por isso é procurada para a confecção de móveis nobres. Ainda para Lima (2011), as espécies *Handroanthus serratifolius* (Vahl.) S. O. Grose e *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos possuem madeira muito valorizada para construções civis, navais e de instrumentos musicais e são de alto valor ornamental.

### **3.3 O Manejo Florestal na Caatinga**

A sazonalidade climática é um fator abiótico que influencia na sobrevivência e na produtividade das plantas. No Brasil, a Caatinga é o principal exemplo de vegetação com clima estacional em que a sazonalidade climática é considerada um fator de estresse e de influência na dinâmica da vegetação (ARAÚJO et al., 2007). A dinâmica vegetacional interfere na rentabilidade da população da região, uma vez que as regiões semiáridas e áridas geralmente se destacam pela densidade populacional e consequente importância e intensidade de uso dos recursos florestais (APNE, 2015).

Há uma limitação da população local quanto ao conhecimento do manejo adequado das espécies da região evidenciada no corte de madeiras nativas voltado para obtenção de lenha

e carvão, que é uma atividade muito comum em áreas secas de todo o mundo, inclusive na Caatinga (ARAÚJO et al., 2007). Faltam informações sobre a época de corte e o tratamento da madeira que causam menor impacto ao Bioma. Tais informações facilitariam a recuperação e a regeneração das áreas e das espécies exploradas.

A Caatinga começou a atrair o olhar de estudiosos no início do século XXI. A Associação Plantas do Nordeste (APNE), em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, Ministério do Desenvolvimento Agrário, Serviço Florestal Brasileiro e outras entidades nacionais e internacionais, realiza ações desde 2001 voltada para o manejo florestal sustentável na Caatinga com pequenos produtores, em especial no sertão pernambucano (DA SILVA et al., 2009). Para os autores, esta iniciativa tem os propósitos de gerar renda e viabilidade econômica para os produtores da região do semiárido, além de incentivar o manejo florestal sustentável e a adequação ambiental no local, contribuindo significativamente para a conservação da biodiversidade deste frágil Bioma.

Segundo Da Silva et al. (2009), o bioma Caatinga apresenta diferenças internas significativas em termos sociais, econômicos e ambientais, criando diferentes cenários de desenvolvimento local. Por isso, as práticas de uso do solo da região requerem atenção especial. A capacidade produtiva das áreas quanto à agropecuária e à silvicultura, a sua localização geográfica e os possíveis impactos ambientais da alteração do uso do solo devem ser analisados profundamente antes, durante e depois da implementação de qualquer projeto de manejo, resultando em iniciativas positivas de sustentabilidade, de conservação do ecossistema e de qualidade de trabalho do agricultor (FUNDAÇÃO KONRAD ADENAUER e GTZ, 2006).

A condução das florestas na Caatinga se dá principalmente pelo método da talhadia, no qual a regeneração florestal é dependente da rebrota das árvores recém cortadas. Em 2012, estavam ativos mais de 450 planos de manejo florestal sustentável na Paraíba (APNE, 2015), correspondendo a uma área de 12.754 ha. Para o Ceará, a área de manejo ativa no mesmo ano corresponde a 116.505 ha.

Ainda, a APNE (2015) conclui que, em 2012, aproximadamente 18.000 hectares de terras com recursos florestais foram explorados legalmente na Paraíba, correspondendo a 100.000 st. Para o Ceará, tal valor é de 14.000 hectares, o que equivale 1.600.000 st/ano. A destinação final da madeira explorada refere-se principalmente à produção de lenha, de carvão vegetal e de estacas.

### **3.4 Determinação do diâmetro de cerne**

O cerne é a parte mais interna do xilema constituído de células mortas que geralmente apresenta coloração mais escura. Para o estudo de cerne, Jóia et al. (2006) ressaltam a importância da determinação do volume de cerne individual e por povoamento através de processos estatísticos de amostragem. Para os autores, esta determinação é particularmente relevante para a quantificação de madeira com uso potencial para a indústria. Isso ocorre porque o cerne possui maiores quantidade de extrativos, impermeabilidade e resistência natural à patógenos em relação ao alburno (WILKINS, 1991), e, portanto, o cerne é mais recomendado para usos nos quais se requer maior resistência física e química da madeira, como para a indústria moveleira e de construção civil.

Segundo Wilkins (1991), a quantidade de cerne na madeira varia de acordo com a idade e a taxa de crescimento da árvore, o clima, o sítio florestal, o tratamento silvicultural adotado e a quantidade de massa foliar do indivíduo. Isso afeta a proporção entre alburno e cerne, influenciando no uso final da madeira.

Jóia et al. (2006) ainda afirmam que a quantificação de cerne na árvore é possível, em algumas espécies, pela análise visual direta do lenho devido às diferenças de coloração entre alburno e cerne. Porém, muitas espécies nativas apresentam fungos de coloração similar à do cerne e/ou ocos na região central da madeira. Além disso, algumas espécies não possuem cerne e alburno com características macroscópicas distinguíveis. Nesses casos em que a identificação visual não é possível, recomendam-se análises anatômicas e químicas da madeira para diferenciar cerne e alburno com maior precisão.

A diferenciação entre cerne e alburno é, em geral, feita a partir de métodos destrutivos em que se faz necessário o abate da árvore. Porém, o método destrutivo é por vezes desgastante devido ao tempo consumido e ao custo de material para a realização de tal método (STANGERLIN et al., 2008).

Já os métodos não-destrutivos permitem informações mais amplas e mais precisas, uma vez que é medido um maior número de amostras em menos tempo (STANGERLIN et al., 2008). Ademais, os métodos não-destrutivos são vantajosos por não haver a necessidade de abater indivíduos arbóreos. Dentre estes métodos, está incluso o ajuste de modelos matemáticos, que inicialmente utiliza o abate para a coleta de dados, mas que, depois dos modelos gerados, não precisa mais derrubar indivíduos.

### **3.5 Modelos volumétricos para madeira**

Ferreira et al. (1977) afirmam que a determinação de volume de madeira para povoamentos florestais é uma questão que preocupa os pesquisadores desde o século XIX, quando as florestas plantadas foram se expandindo e, devido aos bens econômicos advindos da madeira, cresceu o interesse em quantificar o volume das mesmas. Os estudos voltados para estimar diretamente volume de madeira começou no século XX a partir da implantação de tabelas de rendimento, nas quais a idade e o sítio eram as variáveis independentes que resultavam no volume. Desde então se faz uso de estimativas para determinar o volume de madeira, que ainda é de grande interesse.

Segundo os mesmos autores, são inúmeros os estudos que abordam a temática de volumetria de madeira. Estes estudos utilizam equações volumétricas individuais e populacionais, buscando maior precisão nos resultados e maior eficiência no direcionamento do uso final da madeira.

Veiga (1972) foi responsável por diversos estudos pioneiros no ramo dendrométrico, comparando equações e modelos matemáticos para estimar volume de madeira com e sem casca. Seus estudos são de extrema relevância para desenvolver os mercados que utilizam a madeira como matéria-prima.

Para Conceição (2004), o volume pode ser considerado uma das principais características para se avaliar o potencial de uma floresta. Sua estimativa começa em escala individual e pode ser expandida para uma escala populacional a partir do uso de equações volumétricas. O autor ainda opina que a estimativa desses volumes é dificultada principalmente pela variação da forma do perfil do fuste, muito comum em florestas nativas.

Os autores Gevorkiantz e Olsen (1955) concordam que é melhor que o ajuste de equações volumétricas seja feito a partir de variáveis que sejam fáceis de mensurar com exatidão, que tenham alta correlação com o volume e baixa relação entre si. Essas condições fazem com que o volume estimado a partir de equações se aproxime do valor de volume individual real, que é obtido a partir do abate da árvore e da cubagem rigorosa da mesma.

Devido a estudos como o de Veiga em 1972, Conceição (2004) afirma que o volume de árvores tem sido estimado com facilidade e acuracidade a partir do ajuste de equações de volume, que utilizam em sua maioria variáveis capazes de serem obtidas com maior facilidade e precisão, como o diâmetro à altura do peito e a altura total. Porém, esta segunda variável



difícilmente é obtida em campo em florestas nativas e, portanto, é geralmente estimada através de modelos matemáticos. Sales et al. (2015) confirmam que os modelos volumétricos usam tais variáveis independentes de fácil obtenção para atingir maior precisão no ajuste.

### **3.6 Biomassa da madeira**

A partir da determinação de volume de madeira para povoamentos florestais, é possível determinar o potencial de energia advindo da biomassa madeireira, que engloba toda a matéria orgânica contida na madeira. Brito (2007) afirma que o uso da madeira para energia assegura o suprimento da demanda de matéria-prima e diminui a dependência energética externa, o que o autor considera como vantagem em relação às outras fontes de combustíveis.

Segundo a Fundação Konrad Adenauer e GTZ (2006), a energia pode ser compreendida como a capacidade de transformar. Partindo desse conceito, a energia pode tanto estar associada a graves impactos ambientais quanto ser considerada uma fonte de soluções para viabilizar as atividades humanas rumo a sustentabilidade.

Na Caatinga, a biomassa florestal é a fonte energética principal (APNE, 2015). O Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) realizou uma pesquisa histórica que comprova a alta dependência da vegetação nativa para a produção de lenha e carvão vegetal no nordeste brasileiro. Em 1995, a produção total de biomassa lenhosa na região se aproximou dos 45 milhões de toneladas. Desse total, apenas 1,75% foi retirado de madeira de reflorestamento, sendo o resto retirado de mata nativa. Para a energia advinda de carvão vegetal, a produção para o mesmo ano foi superior a 342 mil toneladas, sendo que 15,8% foi proveniente de reflorestamento e o restante de floresta nativa.

O MMA analisou o período de 2002 a 2009 para obtenção de dados que quantifiquem o impacto ambiental da produção de lenha e carvão no país. A cada ano do período analisado, em média, aproximadamente 35,5 milhões de toneladas de lenha transformaram-se em menos de 9 milhões de toneladas de carvão vegetal (BRASIL, 2010). Segundo a mesma fonte, o valor médio anual de lenha utilizada foi superior a 87,5 milhões de toneladas, sendo a maior parte destinada à produção de ferro-gusa e ao consumo residencial.

A Associação Plantas do Nordeste (APNE) realizou em 2015 uma estimativa do consumo anual de madeira para o estado da Paraíba no ano de 2012, e o resultado foi de 665.120 st/ano, sendo a maioria destinada para a produção de energia industrial.

### **3.7 Estoque de carbono em madeira**

Está cada vez mais latente a preocupação da sociedade com relação às mudanças climáticas, que foram aceleradas pelas atividades antrópicas. As atividades humanas, como a queima das florestas resultantes do desmatamento e a queima de combustíveis fósseis, culminam no aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (FERNANDES et al., 2007).

O gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) é o principal responsável pela intensificação do efeito estufa e, conseqüentemente, pelo desequilíbrio do balanço energético entre a terra e o espaço (FERNANDES et al., 2007). O Brasil é um dos países que mais lança  $\text{CO}_2$  na atmosfera devido às suas atividades florestais e às mudanças de uso do solo. Em 2014, o país estava em 6º lugar no ranking de maiores emissores de GEE (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2014).

Neste contexto, é essencial o equilíbrio de carbono global prestado pelas florestas, haja vista que as árvores utilizam o  $\text{CO}_2$  atmosférico no processo de fotossíntese para seu crescimento e desenvolvimento. Dessa forma, as florestas têm como principal vantagem o fato de poderem ser manejadas visando a redução da emissão de  $\text{CO}_2$  atmosférico (FERNANDES et al., 2007), mitigando os efeitos negativos do aquecimento da Terra.

Saber a concentração de carbono presente na biomassa arbórea é imprescindível para conhecer o potencial de conversão da biomassa florestal em estoque de carbono nos ecossistemas (WATZLAWICK et al., 2014). O fator de conversão de biomassa florestal acima do solo em estoque de carbono foi convencionado em 0,5 (IPCC, 1996), mesmo que este número possa subestimar ou superestimar os valores reais, uma vez que são desconsideradas as variações inter e intra-específicas nos processos de reserva de carbono e que se assume a concentração de carbono como sendo função direta e constante da biomassa (WATZLAWICK et al., 2014).

Em 2014, as emissões brasileiras de GEE superaram 1,5 gigatoneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente, sendo que 31,2% desta quantidade foi responsabilidade da mudança de uso do solo, na qual se encaixam as atividades florestais (SEEG, 2014).

Para o bioma Caatinga, um histórico da quantidade de  $\text{CO}_2$  emitida indica que a emissão foi de 40 Tg de  $\text{CO}_2$  equivalente em 1995 e 2000. Já em 2011 e 2012, a emissão diminuiu para 6 Tg de  $\text{CO}_2$  equivalente. Ao mesmo tempo, o bioma foi responsável pela remoção de 5,35 Tg de  $\text{CO}_2$  em 1995 (BRASIL, 2014).

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

A coleta foi realizada pelo Serviço Florestal Brasileiro em novembro de 2014 na região centro-norte do Piauí, nos assentamentos Arizona I e II, Serra do Batista e Canaã, situados no município de Lagoa do Sítio. A vegetação do local é formada por Caatinga arbórea fechada e as espécies estudadas são árvores de grande porte, diferenciando-as das espécies encontradas na Caatinga *sensu stricto*.

Foram realizadas mensurações de discos de madeira sem casca de cada uma das espécies contidas na tabela 1 no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) localizado no Serviço Florestal Brasileiro (SFB). No total, foram medidos 50 discos, sendo o banco de dados composto pelo conjunto de todos os discos mensurados, provenientes de 10 espécies da Caatinga, cada uma incluindo 5 discos de DAP sem casca. Vale destacar que os discos foram retirados do bioma Caatinga por uma equipe do SFB em Área de Manejo Florestal autorizada pelo governo brasileiro e que os mesmos foram retirados objetivando demais estudos em laboratório.

A medição de diâmetros dos discos de madeira ocorreu em duas posições perpendiculares com uma régua para obtenção de um valor médio que contemple a forma irregular dos discos de madeira. Assim foram obtidos o diâmetro total do disco, o diâmetro apenas do cerne e apenas do alburno. A figura 1 mostra um disco de cada espécie utilizado no processo de mensuração.

A importância de distinguir o cerne do alburno é devido a diferença de rendimento gravimétrico desses componentes. Assim será possível conhecer com maior precisão o potencial energético estocado em áreas de Caatinga.

Tabela 1 - Lista das espécies utilizadas para medição dos discos de madeira.

Número	Nome científico	Nome popular
1	<i>Pterodon abruptus</i> (Moric.) Benth.	Amarelo
2	<i>Diptychandra aurantiaca</i> Tul.	Birro-branco
3	<i>Terminalia fagifolia</i> Mart.	Chapada
4	<i>Machaerium</i> cf. <i>brasiliensis</i>	Coração-de-nego
5	<i>Swartzia psilonema</i> Harms.	Jacarandá-sangue
6	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl.) S. O. Grose	Ipê amarelo
7	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Ipê roxo
8	<i>Pityrocarpa moniliformis</i> (Benth.) Luckow & R.W	Rama-de-bezerra
9	<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart.	Piquiá
10	<i>Combretum glaucocarpum</i> Mart.	Sipaúba

Posteriormente, os dados obtidos foram organizados, verificando possíveis erros de medidas e de coleta e identificando os chamados *outliers*, que são informações que aparentam conter erros ou que estão fora dos valores médios observados. Assim, iniciou-se o processo de análise dos dados coletados para ajustar os modelos matemáticos que foram usados para estimar diâmetro de cerne, volume de madeira, quantidades de biomassa e de carbono estocados nos indivíduos observados e quantidade de dióxido de carbono capturado por indivíduo arbóreo.

A escolha dos modelos de melhor ajuste foi baseada na análise do gráfico residual, dos valores de coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado) e do erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$  %), quando possível, representado pela equação a seguir. O modelo que apresentou o maior  $R^2$  ajustado e melhor ajuste no gráfico foi o escolhido. Os modelos foram testados no programa Statistica 7.0 a um nível de significância de 5%.

$$S_{yx} (\%) = \frac{\text{valor real} - \text{valor estimado}}{\text{valor real}} * 100$$

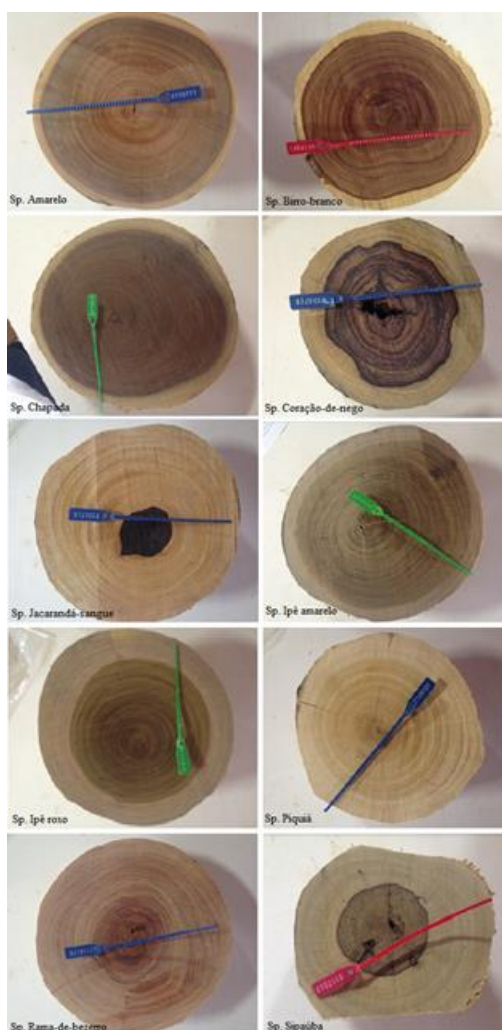


Figura 1 - Imagens de um disco de cada espécie estudada. Fonte: SFB, 2015.

#### 4.1 Ajuste dos modelos para estimar o diâmetro de cerne

Os modelos ajustados para estimar o diâmetro de cerne (PAIVA, 1993) estão numeradas de 01 a 14, objetivando determinar o modelo que melhor aproxima o diâmetro de cerne ajustado com o diâmetro real mensurado em laboratório. Os discos cujo cerne não era distinguível a olho nu foram retirados do banco de dados.

$$\ln(\text{cerne}) = \beta_0 + [\beta_1 * \ln(DAP)] + \varepsilon \quad (01)$$

$$\ln(\text{cerne}) = \beta_0 + [\beta_1 * \ln(DAP)] + [(\beta_2 * \ln(DAP^2))] + \varepsilon \quad (02)$$

$$\ln(\text{cerne}) = \beta_0 + [\beta_1 * \ln(DAP)] + [(\beta_2 * \ln(DAP^2))] + [(\beta_3 * \ln(DAP^3))] + \varepsilon \quad (03)$$

$$\ln(\text{cerne}) = \beta_0 + [\beta_1 * \ln(DAP)^{0,5}] + [\beta_2 * \ln(DAP)] + \varepsilon \quad (04)$$

$$\ln(\text{cerne}) = \beta_0 + [\ln(DAP)]^{\beta_1} + \varepsilon \quad (05)$$

$$\ln(\text{cerne}) = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 * [\ln(DAP)]} + \varepsilon \quad (06)$$

$$\ln(\text{cerne}) = \beta_0 + \frac{\beta_1}{\ln(DAP)} + \varepsilon \quad (07)$$

$$\text{Cerne} = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \varepsilon \quad (08)$$

$$\text{Cerne} = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \varepsilon \quad (09)$$

$$\text{Cerne} = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP^3 + \varepsilon \quad (10)$$

$$\text{Cerne} = \beta_0 + \beta_1 * DAP^{0,5} + \beta_2 * DAP + \varepsilon \quad (11)$$

$$\text{Cerne} = \beta_0 + DAP^{\beta_1} \quad (12)$$

$$\text{Cerne} = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 * DAP} + \varepsilon \quad (13)$$

$$\text{Cerne} = \beta_0 + \frac{\beta_1}{DAP} + \varepsilon \quad (14)$$

Em que:

Cerne indica o diâmetro de cerne (cm); e

DAP é o Diâmetro à Altura do Peito medido a 1,3 metros do solo (cm).

#### 4.2 Ajuste dos modelos volumétricos

Para a estimativa de volume, foram utilizados os dados obtidos pela cubagem rigorosa do fuste comercial feita em campo pelo SFB. Para tal, foram mensurados os diâmetros dos indivíduos nas seguintes alturas: 0,2 metros; 1,2 metros; 1,3 metros (DAP); 2,2 metros; após este ponto, a medição se deu a cada um metro, sendo o fuste comercial do indivíduo mais

alto igual a 7,2 metros. Com estes dados, os volumes comerciais dos indivíduos foram determinados pelo método de Smalian mostrado abaixo.

$$V = \frac{AS_1 + AS_2}{2} * L$$

Em que:

$AS_1$  e  $AS_2$  são as áreas seccionais obtidas nas extremidades de cada secção em  $m^2$ . Seu cálculo está descrito na equação que segue; e

$L$  é o comprimento da secção (m).

$$AS = \frac{\pi * DAP^2}{40.000}$$

Em que:

$DAP$  é o diâmetro à 1,3m (cm).

Feito isso, foram ajustados oito modelos de volume (CAMPOS e LEITE, 2009), explicitados nas equações 15 a 22, com o objetivo de compará-los e determinar qual deles apresentou o melhor ajuste.

a) Equações de Schumacher e Hall

$$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * H^{\beta_2} + \varepsilon \quad (15)$$

$$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(DAP) + \beta_2 * Ln(H) + \varepsilon \quad (16)$$

b) Equações de Spurr

$$V = \beta_0 + \beta_1 * (DAP^2 * H) + \varepsilon \quad (17)$$

$$V = \beta_0 * (DAP^2 * H)^{\beta_1} + \varepsilon \quad (18)$$

c) Equação de Husch

$$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} + \varepsilon \quad (19)$$

d) Equação de Koperzky e Gehrhardt

$$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon \quad (20)$$

e) Equação de Hohenald e Kreen

$$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \varepsilon \quad (21)$$

f) Equação de Brenac

$$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(DAP) + \beta_2 * DAP + \varepsilon \quad (22)$$

Em que:

V é o volume total (m<sup>3</sup>);

H é a altura total do indivíduo (m); e

DAP é o diâmetro à 1,3 metros (cm).

As alturas individuais não foram mensuradas em campo e por isso tiveram de ser estimadas para que o ajuste das equações 15, 16, 17 e 18 pudesse ocorrer. Desta forma, a estimativa da altura se deu a partir da soma do comprimento das toras do indivíduo com a altura do galho mais alto do mesmo, ambos os dados coletados em campo. O comprimento das toras decorreu do seccionamento feito para a realização da cubagem, em que o tamanho de cada tora era de 1 metro, começando a partir de 0,2 metros do solo.

Depois de ajustar as equações 15 a 18 a partir dos volumes obtidos pelo método de Smalian, foi feito o ajuste das equações 15 a 22 baseado no volume calculado a partir da densidade básica e do peso seco dos discos, obtidos pelo SFB em laboratório.

#### 4.3 Ajuste dos modelos para estimar a quantidade de biomassa

A quantidade de biomassa individual foi determinada a partir da seguinte equação:

$$Biomassa = densidade\ básica * volume$$

Em que:

Biomassa equivale a quantidade de biomassa (kg ou g);

Densidade básica é dada em kg/m<sup>3</sup> ou g/cm<sup>3</sup>; e

Volume é dado em m<sup>3</sup> ou cm<sup>3</sup>.

Os modelos que ajustaram a quantidade de biomassa, visando aproximar os valores ajustados dos valores reais, foram os mesmos usados na estimação de volume, mudando-se apenas a variável de interesse, conforme as expressões 23 a 30.

$$Bio = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * H^{\beta_2} + \varepsilon \quad (23)$$

$$Ln(Bio) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(DAP) + \beta_2 * Ln(H) + \varepsilon \quad (24)$$

$$Bio = \beta_0 + \beta_1 * (DAP^2 * H) + \varepsilon \quad (25)$$

$$Bio = \beta_0 * (DAP^2 * H)^{\beta_1} + \varepsilon \quad (26)$$

$$Bio = \beta_0 * DAP^{\beta_1} + \varepsilon \quad (27)$$

$$Bio = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon \quad (28)$$

$$Bio = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \varepsilon \quad (29)$$

$$Ln(Bio) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(DAP) + \beta_2 * DAP + \varepsilon \quad (30)$$

Em que:

Bio é a quantidade de biomassa (kg);

H é a altura total do indivíduo (m); e

DAP é o diâmetro à 1,3 metros (cm).

#### 4.4 Ajuste dos modelos para estimar estoque de carbono

Com os dados de biomassa, foram estimados os estoques de carbono de cada indivíduo arbóreo através da seguinte equação:

$$C = Bio * 0,5$$

Em que:

C é o estoque de carbono presente no indivíduo (kg);

Bio é a biomassa (kg); e

0,5 é o fator de conversão de biomassa para carbono.

Os modelos ajustados para estimar o estoque de carbono também são derivados das mesmas equações volumétricas, conforme equações 31 a 38.

$$C = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * H^{\beta_2} + \varepsilon \quad (31)$$

$$Ln(C) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(DAP) + \beta_2 * Ln(H) + \varepsilon \quad (32)$$

$$C = \beta_0 + \beta_1 * (DAP^2 * H) + \varepsilon \quad (33)$$

$$C = \beta_0 * (DAP^2 * H)^{\beta_1} + \varepsilon \quad (34)$$

$$C = \beta_0 * DAP^{\beta_1} + \varepsilon \quad (35)$$

$$C = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon \quad (36)$$

$$C = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \varepsilon \quad (37)$$

$$Ln(C) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(DAP) + \beta_2 * DAP + \varepsilon \quad (38)$$

Em que:

C é a quantidade de carbono estocado (kg);

H é a altura total do indivíduo (m); e

DAP é o diâmetro à 1,3 metros (cm).



#### 4.5 Conversão de carbono estocado em dióxido de carbono

A quantidade de carbono estocado (C) foi convertida em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) capturado pela madeira dos indivíduos analisados a partir da equação seguinte.

$$CO_2 = C * 3,67$$

Em que:

CO<sub>2</sub> é a quantidade de dióxido de carbono capturado por indivíduo (kg);

C é o estoque de carbono presente no indivíduo (kg); e

3,67 é o fator de conversão de carbono para dióxido de carbono.

O fator de conversão foi obtido pela razão entre a massa molecular do CO<sub>2</sub>, que é igual a 44 u, e a massa atômica do carbono, que é de 12 u. (BROWN et al., 1986 apud BOINA, 2008).

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As espécies Piquiá, Sipaúba e Rama-de-bezerro apresentaram cerne indistinguível a olho nu e, portanto, não entraram no banco de dados para determinação do diâmetro de cerne. Isso ocorreu devido a três fatores: o primeiro refere-se ao fato de algumas árvores estarem ocas, fenômeno comum na Caatinga, o segundo ao fato do cerne ser visualmente parecido com o alburno em alguns indivíduos e o terceiro ao fato da ocorrência de fungos na região do cerne, observado na espécie Sipaúba. Contudo, as três espécies citadas participaram dos ajustes dos modelos de volume, biomassa e carbono.

A redução do banco de dados fez com que os diâmetros de cerne resultantes dos ajustes dos modelos fossem superestimados. Porém, mesmo com esta redução, foi possível chegar a resultados viáveis sobre o ajustamento de modelos para as finalidades propostas. Na tabela 2 tem-se uma média das quantidades de cerne e de alburno encontradas para cada espécie.

Tabela 2 - Médias percentuais da quantidade de cerne e alburno por espécie.

Espécie	Média (%)	
	Cerne	Alburno
Amarelo	87,71	9,74
Birro-branco	88,77	9,45
Chapada	76,43	18,33
Coração-de-negro	56,55	40,1

Jacarandá-sangue	25,9	72,29
Ipê amarelo	71,18	26,42
Ipê roxo	67,37	28,13
<b>Média (%)</b>	<b>67,7</b>	<b>29,21</b>

A tabela 2 indica que, para as espécies analisadas, o cerne representa quase 70% do fuste. Este valor seria ainda maior se as espécies Jacarandá-sangue e Coração-de-nego, respectivamente, tivessem apresentado diâmetros de cerne maiores, condizentes com os valores encontrados nas demais espécies. Uma explicação para tal ocorrido é que o cerne e o alburno foram distinguidos a olho nu pela diferença de coloração entre ambos. É possível que, nestas duas espécies, o elemento cor não seja suficiente para diferenciar estes dois componentes da madeira.

### 5.1 Modelos de diâmetro de cerne ajustados

Para a estimativa de diâmetro de cerne, os modelos 6, 7, 13 e 14 apresentaram valores significativos. Portanto, foram comparados os gráficos residuais e os coeficientes de determinação ajustado de cada uma delas e assim decidida qual a equação que melhor representa os valores reais de diâmetro de cerne.

A equação 13 foi a escolhida por apresentar melhor representação gráfica e maior coeficiente de determinação ajustado. Para este modelo, o  $R^2$  ajustado apresentou valor de 0,61696425, significando que 61,7% do diâmetro do cerne pode ser explicado pelo DAP.

Dessa forma, a equação para estimar diâmetro de cerne é representada por:

$$cerne = \frac{1}{0,0941 + (-0,00154 * DAP)}$$

Abaixo, segue o gráfico de erro construído para a estimativa (figura 2).

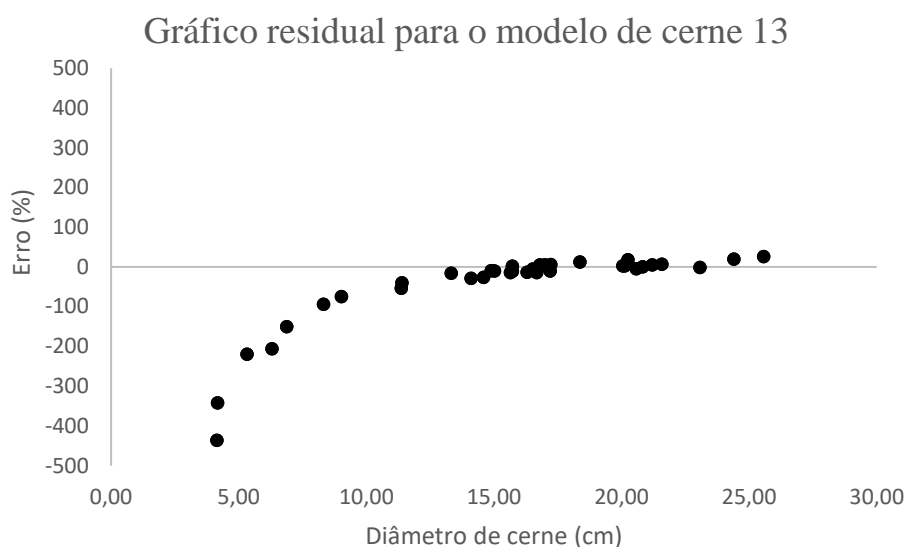


Figura 2 - Gráfico residual para o modelo que melhor estima o diâmetro de cerne.

Como pode ser observado na Figura 2, a equação superestima o diâmetro de cerne para diâmetros abaixo de 10 cm, mas mantém qualidade de ajuste nos diâmetros superiores a 10 cm. Portanto, a aplicação desta equação só é recomendada para este último nível de inclusão.

Para a espécie *Swartzia pylonema*, que apresentou os maiores erros, a superestimação superou 400%, provavelmente porque a quantidade de cerne considerada e medida nas amostras foi muito inferior às das outras espécies, como indica a Tabela 2. Neste caso, é provável que a cor não tenha sido a melhor forma de distinguir cerne e alborno, necessitando de análises químicas e anatômicas para separar estes dois componentes e para resultar em melhores ajustes.

## 5.2 Modelos volumétricos ajustados

Os modelos ajustados a partir dos volumes determinados por Smalian foram os modelos 15, 16, 17 e 18. Dentre eles, o único que apresentou valores significativos de coeficientes foi o modelo de Schumacher e Hall, representado pelo número 16. Dessa forma, a equação para estimar volume é representada por:

$$\ln(V) = -7,88829 + 1,50089 * \ln(DAP) + 1,21384 * \ln(H)$$

Para este modelo, foi possível determinar o  $S_{yx}$  %, haja vista que o modelo é linear. O valor encontrado foi de 22,975% de erro. O coeficiente de determinação ajustado apresentou valor de 0,57214, significando que 57,214% do volume pode ser explicada pelo DAP e pela altura.

Segue o gráfico residual construído para a equação 16, que estima o volume de madeira sem casca dos indivíduos (figura 3).

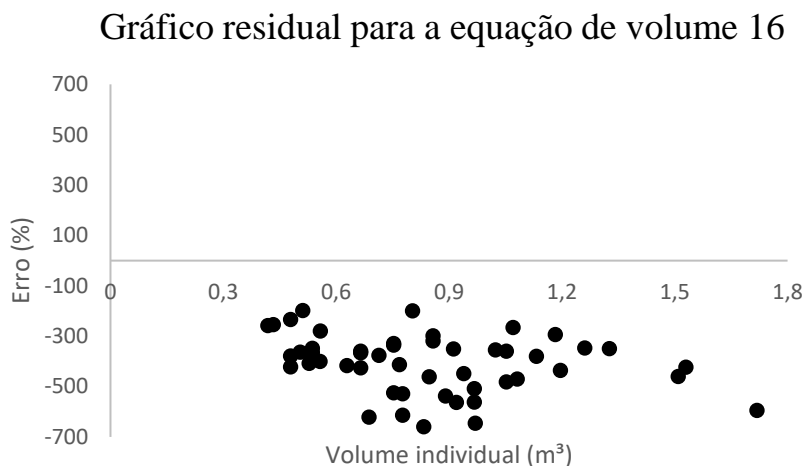


Figura 3 – Gráfico residual para a equação volumétrica que apresentou coeficientes significativos para o primeiro teste de modelos.

Entretanto, os valores de volume estimados foram excessivamente superestimados, indicando que a equação não está adequada e não pode ser aplicada. Isso ocorreu devido ao número reduzido de amostra e à alta variação volumétrica encontrada entre as espécies e entre indivíduos de mesma espécie. Além disso, a variável altura também foi estimada. Tal estimação pode ter acarretado em um acúmulo de erros que culminaram na superestimação volumétrica dos resultados.

Para melhorar a qualidade dos resultados, foram testadas as equações 15 a 22, cujo volume real foi determinado a partir do peso seco e da densidade básica dos discos. Para tais equações, a única que apresentou coeficientes significativos foi a equação de Hohenald e Kreen, representada pelo número 21. Dessa forma, a equação que determina o volume é:

$$V = 0,0247182 + 0,0014410 * DAP + (-0,0000265) * DAP^2$$

Vale observar que a equação acima estima o volume apenas em função do DAP, sugerindo que as equações que utilizam a altura como uma variável não apresentaram coeficientes significativos. Isso confirma a hipótese de que a escolha de estimar a altura pode ter contribuído para um acúmulo de erros nos ajustes.

O valor encontrado para o erro padrão da estimativa relativo foi de 0,123%. O coeficiente de determinação ajustado apresentou valor de 0,11869, significando que 11,9% do volume pode ser explicada apenas pelo DAP. O fato da equação ter apresentado erro padrão muito baixo significa precisão no ajuste. Porém, a correlação entre volume e DAP foi abaixo do esperado, significando que são necessárias outras variáveis para se obter melhores resultados. O gráfico residual é apresentado na figura 4.

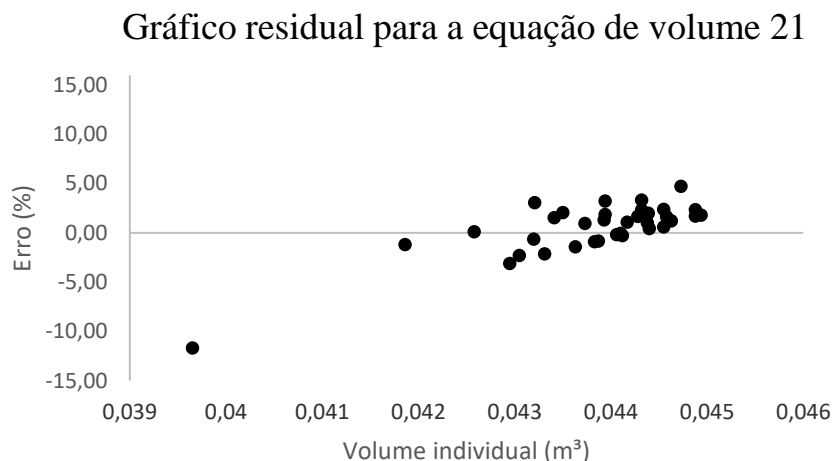


Figura 4 - Gráfico residual para a equação volumétrica que apresentou coeficientes significativos para o segundo teste de modelos.

O gráfico apresenta pontos dispersos cujos erros variam entre 5% e -4%, que é uma faixa de erro admissível. Desconsiderando o *outlier* presente no gráfico, que é o dado (ponto) mais afastado do restante, o valor mais baixo foi de -3,11%, enquanto o máximo foi de +4,69%. Sendo assim, o ajuste desse modelo foi adequado, indicando que o mesmo pode ser usado para estimar o volume das árvores da Caatinga.

### 5.3 Modelos de biomassa e de carbono ajustados

Para os modelos de biomassa, os dois que apresentaram coeficientes significativos foram os modelos 26 e 27 e suas equações estão representadas abaixo, respectivamente:

$$Bio = 0,01129 * (DAP^2 * H)^{0,13207}$$

$$Bio = 0,01225 * DAP^{0,33764}$$

Os gráficos residuais de ambos foram muito similar e estão representados nas figuras 5 e 6. Além disso, os  $R^2$  ajustados também foram parecidos, sendo o referente a primeira equação de 0,41165598 e o da segunda equação de 0,38671758.

### Gráfico residual da equação de biomassa 26

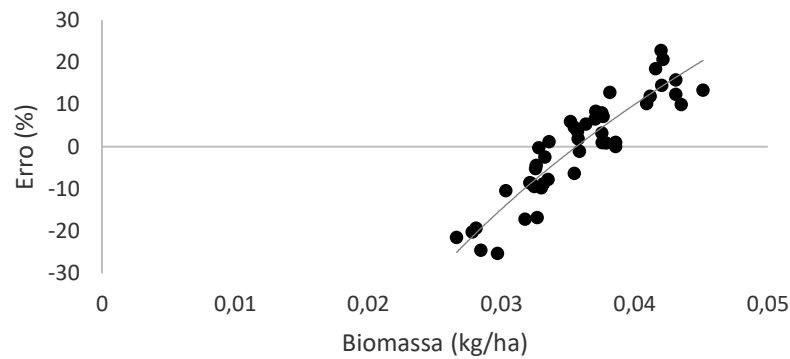


Figura 5 – Gráfico residual para o ajuste do modelo 26 de biomassa.

### Gráfico residual da equação de biomassa 27

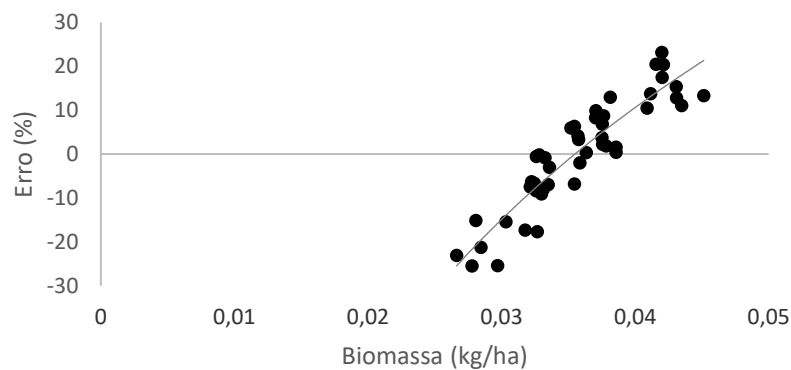


Figura 6 – Gráfico residual para o ajuste do modelo 27 de biomassa.

Para os modelos que estimaram estoque de carbono, os coeficientes significativos foram os das equações 34 e 35, que condizem com os modelos ajustados para biomassa. As equações destes modelos estão representadas abaixo, respectivamente:

$$C = 0,00564 * (DAP^2 * H)^{0,13207}$$

$$C = 0,00613 * DAP^{0,33764}$$

Os respectivos gráficos residuais são mostrados nas figuras 7 e 8 e também foram bastante similares. Além disso, os  $R^2$  ajustados foram os mesmos encontrados para os modelos de biomassa: 0,41165598 e 0,38671758.

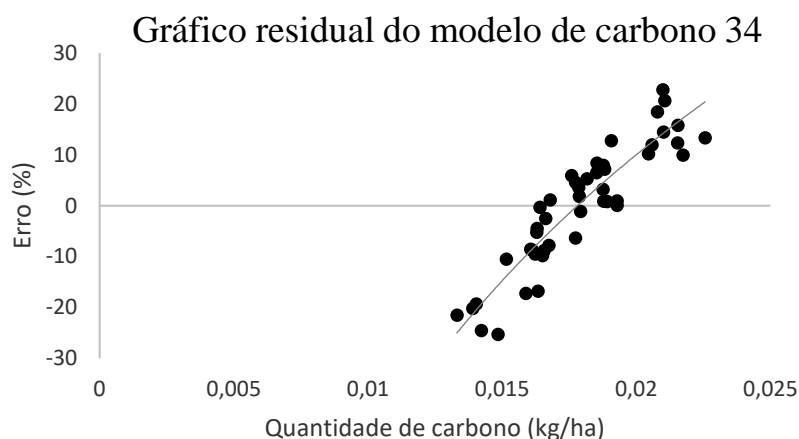


Figura 7 – Gráfico residual para o ajuste do modelo 34 de estoque de carbono.

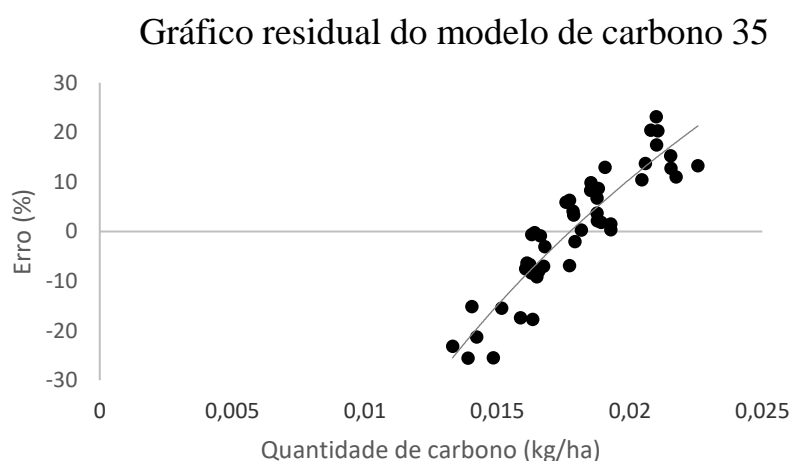


Figura 8 - Gráfico residual para o ajuste do modelo 35 de estoque de carbono.

Os quatro gráficos (figuras 5, 6, 7 e 8) mostram que as variáveis biomassa e estoque de carbono não são bem estimadas pelo DAP e nem pela altura, como indicam os seus coeficientes de determinação ajustados. Tal resultado era esperado, bem como a igualdade entre os  $R^2$  ajustados de ambas as variáveis dependentes, uma vez que a quantidade estocada de carbono é altamente relacionada da quantidade de biomassa.

Portanto, tais resultados confirmam que a biomassa e a quantidade estocada de carbono não apresentaram qualidade no ajuste usando variáveis dendrométricas para tais espécies. A quantidade de biomassa madeireira e, por consequência, a quantidade estocada de carbono pela madeira dependem de outras características, como a densidade do indivíduo, o peso seco e o peso verde do mesmo. O mesmo não ocorre com o volume, que é bem ajustado

por modelos que envolvem, no geral, apenas altura e diâmetro, uma vez que estes dois parâmetros são suficientes para expressar o volume, como expressam os modelos 15 a 22.

Sendo assim, recomenda-se que a biomassa e o carbono sejam calculados pelas equações já apresentadas:

$$Biomassa = densidade\ básica * volume$$

$$C = Bio * 0,5$$

Isso irá garantir maior proximidade entre os valores estimados e os valores reais, uma vez que as variáveis dependentes passam a ser o volume, que pode ser obtido pelo modelo 21, e a densidade básica, informação obtida na literatura para cada espécie ou por determinação laboratorial.

#### **5.4 Quantidade convertida em CO<sub>2</sub>**

Como já foi pontuado, o bioma Caatinga emitiu 40 Tg de CO<sub>2</sub> equivalente em 1995 e removeu 5,35 Tg de CO<sub>2</sub> equivalente deste total (BRASIL, 2014). Considerando a área da Caatinga de 845.000 km<sup>2</sup>, é possível inferir que o bioma emitiu 473 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por hectare e removeu 63 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente por hectare. Já em 2011 e 2012, a emissão diminuiu para 6 Tg de CO<sub>2</sub> equivalente (71 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente por hectare).

Para melhor comparação dos resultados, considerou-se que as florestas de eucalipto no Brasil capturam em média 9,2 t/ha/ano de carbono, ou seja, 9.200 Kg de CO<sub>2</sub> são capturados em um hectare de floresta de eucalipto por ano (SBS, 2006 apud WINK, 2009).

Partindo do cálculo de estoque de carbono, é possível convertê-lo em dióxido de carbono a partir do fator de conversão de 3,67, como já foi mostrado. Dessa forma, através dos valores reais de biomassa estimados, a quantidade de carbono individual capturada para os indivíduos analisados variou entre 0,048866 kg e 0,082832 kg.

Comparando com os valores de carbono capturado pela floresta de eucalipto, os resultados encontrados parecem pequenos. Porém, é importante ressaltar que os valores encontrados são referentes à apenas 50 indivíduos. Se este valor for extrapolado para um hectare ou até mesmo para todo o bioma Caatinga, fica evidente o potencial das árvores em capturar dióxido de carbono atmosférico.



Assim, estes dados indicam a importância de se conhecer a quantidade capturada de CO<sub>2</sub> pelas espécies estudadas, uma vez que mostram o seu potencial de mitigação das consequências negativas do efeito estufa.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ajuste de equações biométricas permite estimar variáveis de indivíduos arbóreos de forma não-destrutiva, ou seja, sem que haja o abate do indivíduo, através de variáveis facilmente obtidas em campo.

O diâmetro de cerne pode ser estimado com qualidade através de dados de DAP para aqueles resultados que apresentarem diâmetro de cerne maior do que 10 cm. Caso contrário, o ajuste da equação não se mostrou eficiente.

A altura estimada não se mostrou um bom parâmetro para ajustes de modelo de volume. Entretanto, o volume pôde ser estimado a partir somente dos dados de DAP, apesar de este ser melhor ajustado com o complemento de outras variáveis.

Os modelos que estimaram a quantidade de biomassa e o estoque de carbono nas madeiras estudadas não forneceram ajustes satisfatórios, como já era esperado. Assim, conclui-se ser mais eficientes estimar tais parâmetros a partir do volume.

Com isso, o estudo colabora para expandir o conhecimento sobre espécies pouco estudadas no Brasil, incentivando o interesse em se conhecer o bioma Caatinga. Os resultados também facilitam futuras pesquisas realizadas em áreas inventariadas do bioma e futuros planos de manejo que possam surgir na região. Além disso, esta pesquisa contribui para se conhecer o potencial madeireiro e o potencial mitigador de GEE de espécies da Caatinga.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APNE – Associação Plantas do Nordeste. **Estatística Florestal da Caatinga**. Recife: PE. v.2, 2015.

ARAÚJO, E. L.; ALBUQUERQUE, U. A.; CASTRO, C. C. Dynamics of the Brazilian Caatinga – a revision concerning the plants, environments and people. **Functional Ecosystems and communities**, v.1, p.15-29, 2007.

BERNARDI, A. C.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B.E.; TAVARES, S.R.L.; CAMPOS, D.V.B.; CRISÓTOMO, L.A. Carbon and nitrogen stocks of an Arenosol under irrigated fruit orchards in semiarid Brazil. **Scientia agricola**. Piracicaba, vol. 64, n. 2, p. 169-175, 2007.

BOINA, A. **Quantificação de estoques de biomassa e de carbono em floresta estacional semidecidual, Vale do Rio Doce, Minas Gerais**. Dissertação de mestrado: Viçosa, MG. 2008.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2ª edição. Brasília, DF. 2014.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Nova delimitação do Semiárido brasileiro**. 2005. Disponível em: <[http://www.mi.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=0aa2b9b5-aa4d-4b55-a6e1-82faf0762763&groupId=24915](http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=0aa2b9b5-aa4d-4b55-a6e1-82faf0762763&groupId=24915)>. Acessado em: 16 de novembro de 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caatinga**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>>. Acessado em: 18 de agosto de 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Subsídios para a elaboração do plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Caatinga**. Brasília, DF, 128 p. 2010.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/ea/v21n59/a14v2159.pdf>>. Acessado em: 25 de julho de 2016.

BROWN, S.; LUGO, A. E.; CHAPMAN, J. Biomass of tropical tree plantation and its implications for the global carbon budget. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 16, p. 390-394. 1986.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. UFV: Viçosa, MG. 3ª edição, 2013.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Biomassa na região nordeste (Online). Disponível em: <[http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/regiao\\_carvao.asp?Regiao=Nordeste](http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/regiao_carvao.asp?Regiao=Nordeste)>. Acessado em: 14 de novembro de 2016.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales São Francisco e Parnaíba. **Inventário de projetos**. 3ª edição. Brasília: CODEVASF, 224 p. 1999.

CONCEIÇÃO, M. B. **Comparação de métodos de estimativas de volume em diferentes idades em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill ex- Maiden**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2004.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. de; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A. de; ARAUJO, J. L. P. **A região semiárida brasileira**. Embrapa Semiárido, c. 1, p. 21-48. 2011.

DA SILVA, J. P. F.; SOARES, D., G.; PAREYN, F., G., C. Manejo florestal da caatinga: uma alternativa de Desenvolvimento sustentável em projetos de assentamentos Rurais do semiárido em Pernambuco. **Revista Brasileira de Agroecologia**, vol. 4, n. 2, 2009.

FERNANDES, T. J. G.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; ALVARENGA, A. P. Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *Hevea* sp., aos 12 anos de idade, na zona da mata mineira. Viçosa, MG: **Revista Árvore**, v.31, n.4, p.657-665. 2007.

FERREIRA, C.A.; MELLO, H. A.; KAJIYA, S. Estimativa do volume de madeira aproveitável para celulose em povoamentos de *Eucalyptus* spp: Determinação de equações para o cálculo do volume de povoamentos de *Eucalyptus* spp. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF**, n. 14, p. 29-50, 1977.

FILHO, L. M. A. L.; SILVA, J. A. A. da; CORDEIRO, G. M.; FERREIRA, L. R. C. Modelagem do crescimento de clone de *Eucalyptus* usando o modelo de Chapman-Richards com diferentes distribuições simétricas dos erros. Santa Maria, RS: **Ciência Floresta**, v. 22, n. 4, p. 777 – 785. 2012.

FUNDAÇÃO KONRAD ADENAUER e GTZ. **Tecnologias Apropriadas para Terras Secas** - Manejo sustentável de recursos naturais em regiões semi-áridas no Nordeste do Brasil/organizadores: Angela Küster, Jaime Ferré Martí, Ingo Melchers – Fortaleza, CE: Fundação Konrad Adenauer e Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 212 p. 2006.

GEVORKIANTZ, S. R. e OLSEN, L. P. **Composite Volume Tables for Timber and Their Application in the Lake States**. Technical Bulletin n. 1104. United States Department of Agriculture: Washington, 1955.

GIULIETTI, A. M.; BOCAGE, A. L. N. du; CASTRO, A. A. J. F.; FERNANDES, V. J.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GAMARRA-ROJAS, C. F. L.; QUEIROZ, L. P. de; FIGUEIREDO, M. A.; RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V.; HARLEY, R. M. **Diagnóstico da vegetação nativa do Bioma Caatinga**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente: Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

HILLIS, W. E. **Heartwood and tree exudates**. Berlin: Springer Verlag, 268 p. 1987.

IBGE. Mapa de Biomas e de Vegetação. 2004. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/23ct9>>. Acesso em 24 de abril 2015.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Land use change and forestry. In: **Revised 1996 guidelines for national GHG inventories: reference manual**. p. 5.1-5.75, 1996.

JÓIA, H.A.; FONSECA, T.; SILVA, M.E.; MARQUES, C.P. Métodos não destrutivos do diâmetro à altura do peito em eucalipto e em choupo. **Cerne**, Lavras, vol. 12, n. 4, p. 309-313, 2006.

LIMA, B. G. **Caatinga: espécies lenhosas e herbáceas**. Mossoró, RN: EdUfersa, 2011.

LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil. Vol. 1. 5ª edição. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2ª edição. Fortaleza, CE: Printcolor Gráfica e Editora, 2012.

PAIVA, H. N. Revista Árvore/SIF. vol. 17, n. 1. Viçosa, MG: SIF, 1993.

SALES, F. C. V.; SILVA, J. A. A. da; FERREIRA, L. R. C.; GADELHA, F. H. L. Ajustes de modelos volumétricos para o clone *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco. Curitiba, PR: **Revista Floresta**, v. 45, n. 4, p. 663 – 670. 2015.

SBS - Sociedade Brasileira de silvicultura. **Fatos e números do Brasil florestal**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br>>. Acessado em: 10 de dezembro de 2016.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Os Biomas e Suas Florestas**. 2013. Disponível em <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/os-biomas-e-suas-florestas>>. Acesso em 24 de abril 2015.

SEEG - **Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. 2014. Emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil em 2014 se mantêm praticamente estáveis. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/en/2015/11/20/emissoes-de-co2-no-brasil-em-2014-se-mantem-praticamente-estaveis/>>. Acessado em: 24 de novembro de 2016.

SOUZA, A. L.; BOINA, A.; SOARES, C. P. B.; VITAL, B. R.; GASPAR, R. O.; LANA, J. M. Estoque e crescimento em volume, biomassa, carbono e dióxido de carbono em Floresta Estacional Semidecidual. **Revista Árvore**, v. 25, p. 1277-1285. 2011.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. L. X.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. Recife, PE: **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 2. 2008.

VEIGA, R. A. A. (1972). Comparações de equações de volume para *Eucalyptus saligna* Smith I - Equações aritméticas não formais. Curitiba, PR: **Revista Floresta**, v. 4, nº 1, p. 81-94. 1972.

WATZLAWICK, L. F.; MARTINS, P. J.; RODRIGUES, A. L.; EBLING, A. A.; BALBINOT, R.; LUSTOSA, S. B. C. Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista e efeito do grupo ecológico. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 613-620. 2014.

WILKINS, A.P. Sapwood, Heartwood and bark thickness of silviculturally treated *Eucalyptus grandis*. **Wood Science and Technology**, v. 25, p. 415-423, 1991.

WINK, C. **Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptus* sp. implantados em campo nativo**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria. Dissertação de Mestrado, 2009.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **6 Graphs Explain the World's Top 10 Emitters**. 2014. Disponível em: <<http://www.wri.org/blog/2014/11/6-graphs-explain-world%E2%80%99s-top-10-emitters>>. Acessado em: 16 de novembro de 2016.